



CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA

CONSTRUCTION OF A DIDACTIC BENCH FOR THE STUDY OF THE CHARACTERISTIC CURVE OF A CENTRIFUGAL PUMP

Luiz Phillipe Knupp Perfeito¹,
Rômulo Sartori², Jhonny Huertas³

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v45p536-550.2026

RESUMO: As bombas centrífugas são equipamentos amplamente utilizados em diversas aplicações residenciais e industriais. Conhecer experimentalmente as características de seu funcionamento é importante para a formação de um engenheiro. O objetivo deste trabalho foi construir uma bancada didática para o estudo da curva característica de uma bomba centrífuga. Inicialmente, definiu-se o *layout* do sistema hidráulico; depois, foram selecionados os materiais e, finalmente, foi montada a bancada, composta pelos seguintes componentes: reservatório, bomba centrífuga, tubulações de sucção e recalque, acessórios e instrumentos de medição de pressão e de vazão. A bancada foi validada por meio da obtenção da curva característica da bomba. Foram realizados testes em três rotações do rotor para validar os conceitos de similaridade. Foram obtidas três curvas características de $Q \times H$, do tipo *rising*, para rotações do rotor de 913, 2765 e 8680 rpm. Observou-se que, com o aumento da energia mecânica, o fluido recebe mais energia total. Conclui-se que é viável construir uma bancada didática para o estudo da curva característica de uma bomba centrífuga, capaz de validar conceitos teóricos.

PALAVRAS-CHAVE: bancada didática; bomba centrífuga; curva característica.

ABSTRACT: Centrifugal pumps are widely used in various residential and industrial applications. Understanding their operating characteristics experimentally is important for an engineer's training. The objective of this work was to construct a didactic test bench for studying the characteristic curve of a centrifugal pump. Initially, the hydraulic system layout was defined; then, the materials were selected and, finally, the test bench was assembled, composed of the following components: reservoir, centrifugal pump, suction and discharge piping, accessories, and pressure and flow measurement instruments. The test bench was validated by constructing the pump's characteristic curve. Tests were performed at three rotor speeds to validate the similarity concepts. Three $Q \times H$ rising characteristic curves were obtained for rotor speeds of 913, 2765, and 8680 rpm. It was observed that as mechanical energy increases, the fluid receives more total energy. It can be concluded that a didactic bench can be constructed to study the characteristic curve of a centrifugal pump and validate theoretical concepts.

KEYWORDS: didactic bench; centrifugal pump; characteristic curve.

¹ Engenheiro Mecânico pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, campus Nova Friburgo, phillipeknupp@gmail.com

² Graduando em Engenharia Mecânica e de Energia, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, romulo0192@hotmail.com

³ Professor do Departamento de Engenharia Mecânica e Energia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, campus Nova Friburgo, jhonnyhf@iprj.uerj.br



INTRODUÇÃO

As bombas centrífugas são equipamentos cuja função é transferir energia cinética a fluidos, a fim de proporcionar energia de pressão para seu escoamento em tubulações, superar elevações, aumentar sua vazão, entre outros fins (Bachus *et al.*, 2003). As bombas desempenham um papel essencial em uma ampla gama de setores civis e industriais, como bombeamento de água em residências, tratamento de água, agricultura, petroquímica, entre outros (Girdhar *et al.*, 2005).

Por ser um equipamento de ampla utilização em campos de atuação dos profissionais formados em Engenharia, o estudo e a compreensão de seu funcionamento são importantes para aprimorar o entendimento teórico e prático dos princípios fundamentais de Engenharia que se manifestam em sua operação (Macintyre, 1997).

A altura manométrica de uma bomba centrífuga é a medida da energia total cedida por uma bomba a um fluido. Essa grandeza representa a diferença de pressão entre o bocal de entrada do fluido e o bocal de saída (Macintyre, 1997). Em outras palavras, a altura manométrica é um dado que indica a capacidade de uma bomba de elevar a pressão do fluido em um encanamento, a fim de superar as resistências ao seu escoamento em tubulações e acessórios (Alé, 2011).

A vazão refere-se ao volume que uma bomba é capaz de movimentar em determinado intervalo de tempo. Ela é uma grandeza fundamental e está diretamente relacionada à capacidade de uma bomba de movimentar o fluido por meio de um sistema. A vazão é influenciada pela potência da bomba e pelas condições de operação (Macintyre, 1997).

O principal método para o estudo das características de funcionamento das bombas centrífugas e dos fatores que influenciam seu desempenho, como a geometria do rotor, é a construção da curva característica, por meio da obtenção de dados de pressão e de vácuo na descarga e na aspiração (Macintyre, 1997). Para que isso seja possível, além de uma instalação hidráulica instrumentada que permita a coleta de dados por meio de instrumentos de medição, é necessário variar pelo menos uma das grandezas de funcionamento, como a vazão, a altura manométrica e a velocidade angular. A curva característica de uma bomba é uma representação gráfica, fornecida pelo fabricante, que mostra o desempenho do equipamento, relacionando a vazão (Q) no eixo horizontal com a altura manométrica (H), a potência consumida (N), o rendimento (η) requerido no eixo vertical. Ela define o comportamento da bomba para um diâmetro de rotor e rotação específicos (Alé, 2011).



Dessa forma, define-se como objetivo principal a construção de uma bancada com bomba centrífuga adaptada às condições de laboratório e de ensino, de fácil operação e segura, que permita aos estudantes compreender empiricamente variáveis relacionadas aos aspectos construtivos e de operação desse tipo de máquina em instalações hidráulicas, realizando cálculos para a obtenção da curva característica e a avaliação dos resultados obtidos e do desempenho do equipamento.

METODOLOGIA

O desenvolvimento de uma bancada para o estudo da curva característica de uma bomba centrífuga foi baseado em três etapas: (a) elaboração do *layout* do sistema, considerando os componentes indispensáveis, como bomba, tubulações, instrumentação e estrutura de suporte; (b) construção da bancada conforme o *layout* definido; e (c) realização de testes experimentais para validar o sistema sob diferentes condições de funcionamento.

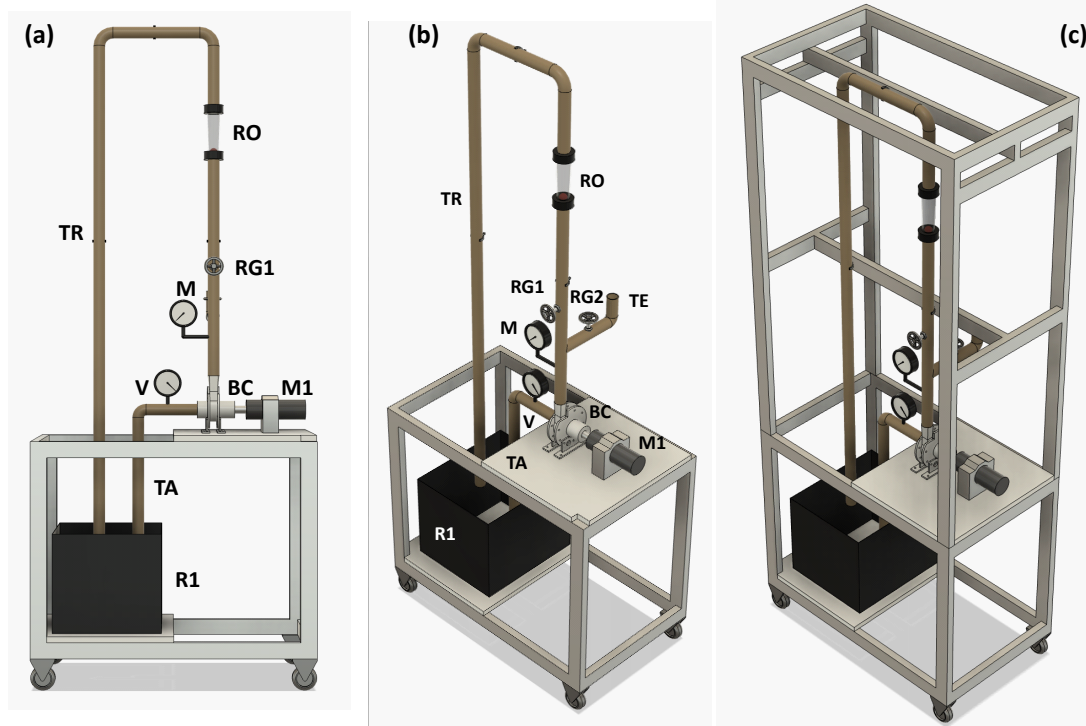
Definição do *layout* do sistema

O *layout* da bancada foi definido como um sistema em circuito fechado. Um fluido de trabalho deverá ser succionado de um reservatório por meio de uma bomba centrífuga, passar pela tubulação de sucção e recalque e retornar ao reservatório. O *layout* do sistema foi pensado para estar composto por cinco componentes: i) uma bomba centrífuga, que, para este trabalho, será uma bomba projetada e construída conforme o trabalho de Perfeito (2024); ii) um reservatório para acolher a água como fluido de trabalho; iii) um sistema de tubulação para a sucção e recalque da água de e para o reservatório; iv) instrumentos de medição de vazão e de pressão; e v) uma estrutura de suporte do sistema para acolher a bomba, o reservatório e sustentar a tubulação.

Os desenhos do *layout* proposto do sistema são apresentados na Figura 1. Os desenhos foram modelados no *software* CAD 3D SolidWorks. A nomenclatura apresentada no esquema é descrita a seguir: V – vacuômetro; M – manômetro; RO – rotâmetro; RG1 e RG2 – registros de gaveta; BC – bomba centrífuga; M1 – motor elétrico; TA – tubulação de aspiração; TR – tubulação de recalque; e TE – tubulação de escorvamento da bomba. A Figura 1 (a) apresenta uma vista frontal do sistema, mostrando a configuração em circuito fechado. Parte da estrutura de suporte,

formada por perfis de alumínio, base em MDF e rodízios, pode ser observada na Figura 1(b), enquanto o sistema com a estrutura de suporte completa, com perfis de alumínio que resguardam a tubulação de recalque, é apresentado na Figura 1(c).

Figura 1 – Desenhos da bancada feitos no SolidWorks: (a) vista frontal; (b) vista isométrica com parte da estrutura de suporte; e (c) vista isométrica mostrando toda a estrutura de suporte

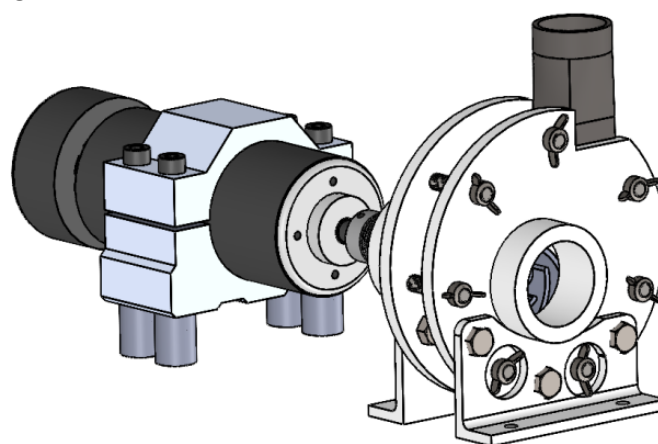


Fonte: elaborada pelos autores.

O desenvolvimento da bancada foi baseado em diversos trabalhos sobre bancadas didáticas para o estudo da curva característica de uma bomba centrífuga. Trabalhos como os de Nicoli (2004), Andrade *et al.* (2018), Gomes *et al.* (2018) e Fraga *et al.* (2021) abordaram a construção de uma bancada didática para a determinação da curva característica de uma bomba centrífuga. Entretanto, esses trabalhos apresentaram sistemas mais robustos e caros; além disso, todos utilizaram uma bomba comercial no sistema e um conjunto de instrumentação mais complexo. Neste trabalho, buscou-se construir uma bancada de baixo custo, utilizando uma bomba projetada e construída, conforme apresentado no trabalho de conclusão de curso de Perfeito (2024). A bancada, para uso prático, utiliza instrumentação analógica simples e de baixo custo. No entanto, também apresenta viabilidade para a instalação de instrumentos digitais de medição de pressão e vazão, como pressostatos e sensores de vazão.

A bomba centrífuga instalada na bancada foi projetada com as seguintes características específicas: diâmetro do rotor = 0,05 m; diâmetro da boca de entrada do rotor = 0,0237 m; diâmetro de saída = 0,019 m; número de pás = 6; larguras das pás no bordo de entrada = 0,023 m, saída = 0,0042 m e ângulo $\beta_2 = 20^\circ$. Nessa bomba, a carcaça e o motor estão vinculados por um eixo rotativo. O motor elétrico foi suportado sobre uma base de fixação. Um desenho da bomba em 3D foi feito no formato Parasolid, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Desenho 3D da bomba utilizada na bancada



Fonte: elaborada pelos autores.

Construção da bancada

A etapa de construção da bancada didática foi conduzida com o uso de diversos materiais. Estes materiais foram classificados como materiais para: i) o sistema hidráulico; ii) o sistema de instrumentação e acionamento da bomba; e iii) o suporte estrutural do sistema hidráulico.

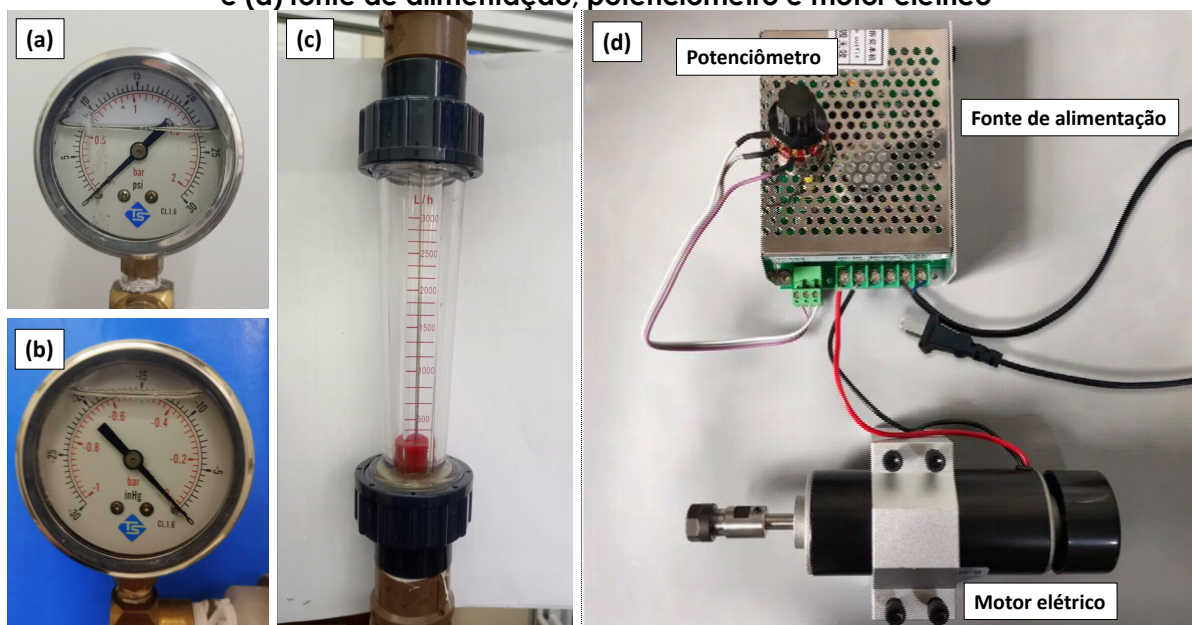
Sistema hidráulico

Os materiais usados para essa parte do sistema foram: 1 reservatório de 30 L de polipropileno, com dimensões de 30,5 × 42,5 cm; 1 bomba centrífuga, cujas especificações estão detalhadas na Tabela 1; 2,5 m de tubo de PVC de $\frac{3}{4}$ de polegada; 4 joelhos de 90° soldáveis; 1 válvula de pé com crivo; 2 registros de gaveta; 2 cruzetas de $\frac{3}{4}$ de polegada soldáveis; 3 uniões soldáveis; 1 adaptador soldável curto com bolsa e rosca para registro; 5 luvas de transição; 1 bucha de redução de 1 $\frac{1}{4}$ para 1 polegada; 1 bucha de redução de 1 para $\frac{3}{4}$ de polegada; 1 conector macho; 1 adesivo em bisnaga; e 1 fita veda-rosca.

Sistema de instrumentação e acionamento da bomba

Os instrumentos utilizados foram: 1 rotâmetro (faixa de vazão de 1 a 3000 L/h), 1 manômetro (faixa de pressão de 0 a 30 psi, com escala de 5 psi) e 1 vacuômetro (faixa de pressão de -30 a 0 in Hg, com escala de 5 in Hg). Para o acionamento da bomba, foram necessários um motor elétrico de corrente contínua de 0,5 cavalo-vapor de potência, uma fonte de alimentação e um potenciômetro para variar a rotação do motor. Também foi necessário um suporte para a fixação do motor à mesa.

Figura 3 – Componentes do sistema hidráulico: (a) manômetro, (b) vacuômetro, (c) rotâmetro e (d) fonte de alimentação, potenciômetro e motor elétrico



Fonte: elaborada pelos autores.

Suporte estrutural do sistema hidráulico

O suporte estrutural do sistema hidráulico foi composto pelos seguintes materiais: 2 peças de MDF, de 1,5 cm de espessura, cor branca, com base inferior de 50 × 50 cm e base superior de 50 × 35 cm; 8 m de perfis de alumínio, de seção 2 × 4; 48 parafusos; 16 cantoneiras; e 4 rodízios.

A bancada foi construída com base no *layout* previamente definido. O suporte estrutural, com perfis de alumínio, bases de MDF e rodízios, foi montado primeiro para acomodar o sistema hidráulico. Depois, foi instalada a bomba com o motor, ambos fixados à base de MDF com parafusos, procurando-se garantir o alinhamento correto do eixo que os une. Com o uso de pedaços de MDF, utilizados



como cantoneiras, o reservatório foi posicionado na base inferior do suporte estrutural. Finalmente, foi montado o sistema hidráulico, incluindo a tubulação e os instrumentos de medição de pressão e vazão. A tubulação de recalque foi fixada em dois pontos no perfil transversal de alumínio, acima do nível da bomba, para conferir estabilidade ao sistema. O valor estimado da bancada foi de R\$ 1.500,00 (mil e quinhentos reais).

Testes experimentais

A etapa final da metodologia consistiu na descrição dos testes da bancada construída. Os testes da bancada experimental consistiram na construção da curva característica da bomba em três rotações distintas do rotor.

Curva característica da bomba

A curva característica da bomba foi construída relacionando, para cada valor de vazão, o valor da altura manométrica correspondente. Para obter vários valores de vazão e altura manométrica, a vazão foi ajustada por meio da abertura parcial de um registro de gaveta. Os valores da altura manométrica foram obtidos com a equação [1], que permite calcular a altura manométrica a partir das leituras do vacuômetro e do manômetro. Na equação, (P_v) corresponde à pressão no vacuômetro (foram usados valores positivos da pressão vacuométrica), (P_m) corresponde à pressão no manômetro, γ corresponde ao peso específico da água e m corresponde à diferença de altura entre o manômetro e o vacuômetro, que foi de 0,075 m. Como a bomba não é afogada, as leituras de pressão se somam.

$$H = \frac{P_m + |P_v|}{\gamma} + m \quad \text{Eq. [1]}$$

O procedimento experimental para coletar dados destinados à construção da curva característica da bomba começa com o preenchimento do reservatório com água à temperatura ambiente de 20 °C. Depois, prossegue-se à etapa de escorvamento da bomba, abrindo-se completamente o registro de gaveta RG2 e introduzindo-se água com a ajuda de um funil até preencher a tubulação de sucção ou aspiração e a bomba até a tubulação de escorvamento (Figura 1(b)). Logo depois, fecha-se RG2.

Depois, abre-se parcialmente o registro de gaveta RG1 e aciona-se a bomba na rotação máxima do motor, ajustando o potenciômetro na posição máxima.



Registra-se a leitura da vazão da água, que começa a ser bombeada, no rotâmetro (RO), bem como as pressões no vacuômetro (P_v) e no manômetro (P_m). Depois, abre-se o RG1 para outra posição e registram-se novamente os valores de vazão e pressão. Repete-se essa operação para uma rotação dada até que RG1 esteja completamente aberta. Diversas leituras foram registradas. Com os dados registrados e utilizando a Equação (1), calcula-se o valor de H . Em seguida, constrói-se a curva característica da bomba de H versus Q . Foram usadas três rotações do motor, controladas pelo potenciômetro. Dessa forma, foram obtidas três curvas características. Os valores de rpm do rotor foram registrados por meio da leitura de rotação no eixo do rotor com o uso de um tacômetro.

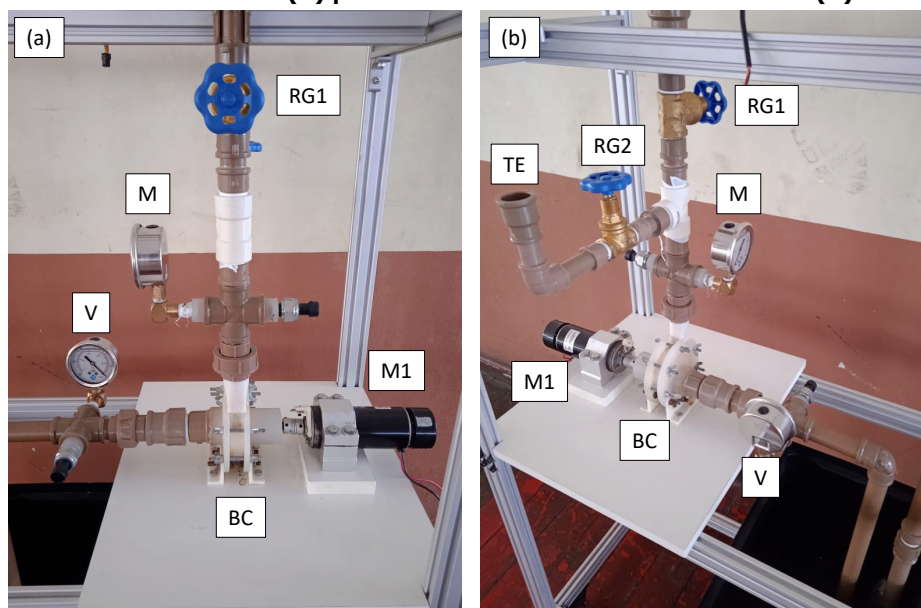
Por ser o foco do trabalho avaliar a viabilidade da construção de uma bancada didática com a instrumentação básica necessária para permitir a construção da curva característica H em função de Q , não foram considerados no projeto instrumentos para a medição da tensão e da corrente elétrica do motor elétrico, necessárias à determinação da potência da bomba em diferentes vazões e, conseqüentemente, não foram determinados os valores de rendimento. Dessa forma, não são apresentados como resultados nem a curva de rendimento nem o ponto de máxima eficiência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são divididos em: (a) bancada didática experimental; e (b) resultados da curva característica da bomba em três rotações do rotor.

Bancada didática

A parte central do sistema hidráulico é apresentada na Figura 4. Podem ser observados a bomba (BC) e o motor (M1) fixados na base de MDF e vinculados pelo eixo rotativo, devidamente alinhados. Na tubulação de entrada da bomba, foi instalado um vacuômetro de fole glicerinado (V). Na tubulação de saída da bomba foi instalado o manômetro, também de fole glicerinado (M), para evitar a vibração da agulha do relógio. Para o escorvamento da bomba foi instalada uma tubulação a partir de um T seguido de um registro de gaveta (RG2) seguido de um joelho de 90° e uma luva soldável de $\frac{3}{4}$ para 1 polegada de diâmetro (TE). As tubulações de entrada e saída da bomba são conectadas por meio de uma união rosqueada.

Figura 4 – Bancada construída: (a) parte central do sistema hidráulico e (b) vista isométrica

Fonte: elaborada pelos autores.

Tanto o vacuômetro quanto o manômetro estão instalados em uma cruzeta. Nessa cruzeta está instalado um pressostato para permitir, em uma etapa futura do trabalho, o uso de sensores de pressão que registrem as medições digitalmente ou por meio do Arduino. As imagens apresentadas na Figura 4 representam o coração do sistema hidráulico. As diferentes vazões são obtidas ajustando RG1. Para cada abertura de RG1, são registradas as pressões no vacuômetro e no manômetro.

A operação da bancada deve ser conduzida por uma pessoa devidamente treinada. Para assegurar seu adequado funcionamento, devem ser previstos testes periódicos para verificar a operação da bomba e dos instrumentos de medição.

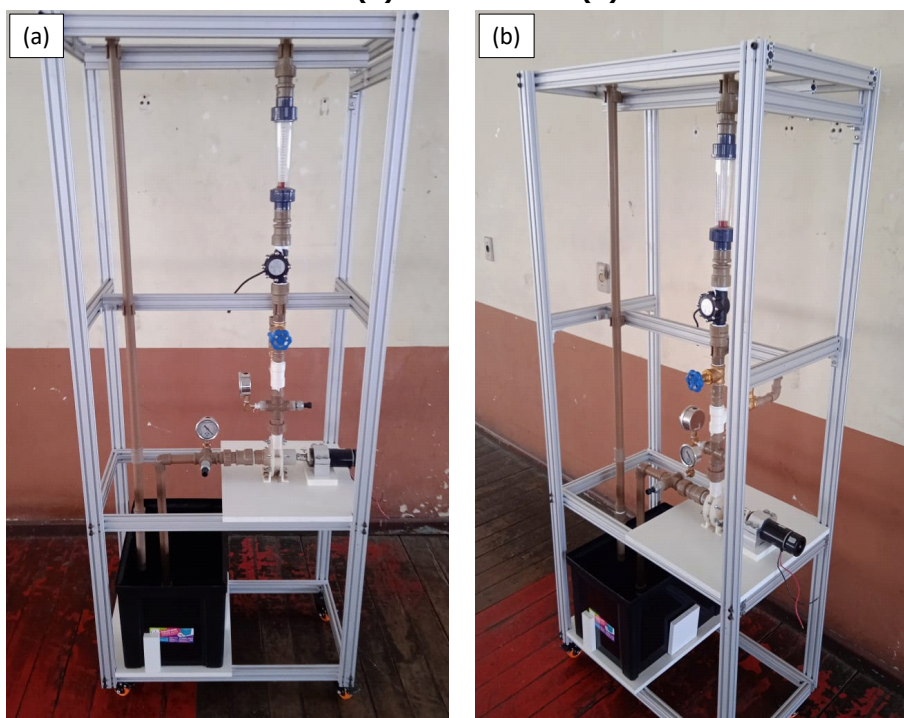
O sistema completo é apresentado na Figura 5. Pode-se observar que, na tubulação de recalque, após RG1, foi instalado um rotâmetro (RO), no qual será registrada a vazão da água em diferentes condições de fechamento de RG1. A tubulação de recalque retorna ao reservatório para fechar o sistema e formar um circuito fechado. O rotâmetro pode ser removido da tubulação por meio das uniões rosqueadas instaladas antes e depois dele. O reservatório instalado na base inferior está fixado de modo a não se mover, graças aos pequenos blocos de MDF brancos fixados à base. Visando a futuros trabalhos de aprimoramento da bancada experimental, foi instalado um sensor de vazão, da marca CFACIL, modelo YF-S201, para o registro da vazão com o Arduino.

Também se observa que todo o sistema hidráulico está suportado por uma estrutura de perfis de alumínio do tipo estrutural, com 2 x 4 cm. A estrutura suporta bases de MDF e possui quatro rodízios para facilitar o deslocamento da bancada.

A tubulação de sucção apresenta uma válvula de pé com crivo, não observada nas imagens da Figura 5. A tubulação de recalque possui três pontos de fixação na estrutura de suporte de alumínio. Dois na viga superior e um na viga intermediária. A fixação foi realizada com três abraçadeiras de PVC.

Apesar dos resultados obtidos com a construção da bancada, pode-se afirmar que ela apresenta limitações, mencionadas a seguir: i) os instrumentos de medição de pressão e vazão são analógicos (mas isso pode ser aprimorado com os pressostatos e o sensor de vazão já instalados); ii) o sistema não tem um mecanismo para registrar a voltagem e amperagem do motor para determinar a curva de potência em função da vazão e que permita também determinar a curva de rendimento em função da vazão; e iii) o sistema não é automatizado para acionar o registro de gaveta RG1 e registrar em um computador os valores de P_v e P_m e a construção da curva característica da bomba.

Figura 5 – Bancada construída: (a) vista frontal e (b) vista isométrica do sistema



Fonte: elaborada pelos autores.



Curvas características da bomba

As Tabelas 1 a 3 apresentam os dados experimentais de vazão e pressões do vacuômetro e do manômetro, incluindo as incertezas dos instrumentos de medição, registrados para diferentes condições de abertura de RG1, em três rotações distintas de 913 rpm, 2765 rpm e 8680 rpm. Nas tabelas, também são apresentados os resultados calculados da altura manométrica (H), com erro propagado de 0,39 m. O cálculo da incerteza de H foi determinado pela seguinte equação:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sigma_{P_m}^2 + \sigma_{P_v}^2}{\gamma^2} + \sigma_m^2} \quad \text{Eq. [2]}$$

em que $\sigma_{P_m} = 3447 \text{ Pa}$, $\sigma_{P_v} = 1693 \text{ Pa}$, $\gamma = 9810 \text{ M/m}^3$ e $\sigma_m = 0,001 \text{ m}$.

Tabela 1 – Dados de vazão, pressão e altura manométrica para $n_1 = 913 \text{ rpm}$

Q (L/h) ± 166,6	Q (L/s)	P _m (psi) ± 0,5	P _m (Pa) ± 3447	P _v (inHg) ± 1,0	P _v (Pa) ± 1693	H (m) ± 0,39
1750	0,48	0,1	689	2,5	8466	1,01
1500	0,41	0,6	4137	1,9	6434	1,15
1250	0,34	1,2	8274	1,3	4402	1,37
1000	0,27	1,3	8963	1,2	4064	1,40
500	0,14	2,1	14479	0,6	2032	1,76
300	0,08	2,5	17237	0,6	2032	2,04

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 2 – Dados de vazão, pressão e altura manométrica para $n_2 = 2765 \text{ rpm}$

Q (L/h) ± 166,6	Q (L/s)	P _m (psi) ± 0,5	P _m (Pa) ± 3447	P _v (inHg) ± 1,0	P _v (Pa) ± 1693	H (m) ± 0,39
2500	0,68	0,6	4137	6,8	23027	2,84
2250	0,61	1,8	12411	5,0	16932	3,07
1750	0,48	3,7	25511	3,1	10498	3,75
1500	0,41	4,3	29647	2,5	8466	3,95
1250	0,34	4,8	33095	1,8	6096	4,07
1000	0,27	5,1	35163	1,7	5757	4,25
500	0,14	6,2	42748	1,0	3386	4,78
300	0,08	6,8	46884	0,6	2032	5,06

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 3 – Dados de vazão, pressão e altura manométrica para $n_3 = 8680$ rpm

Q (L/h) ± 166,6	Q (L/s)	P _m (psi) ± 0,5	P _m (Pa) ± 3447	P _v (inHg) ± 1,0	P _v (Pa) ± 1693	H (m) ± 0,39
3000	0,82	1,2	8274	8,7	29462	3,92
2750	0,75	3,0	20684	7,8	26414	4,88
2500	0,68	3,7	25511	6,2	20996	4,82
2000	0,55	6,1	42508	4,0	13546	5,74
1500	0,41	7,3	50332	2,5	8466	6,07
1000	0,27	8,2	56537	1,5	5080	6,36
500	0,14	9,5	65500	1,1	3725	7,13
300	0,08	10,1	69637	0,6	2032	7,38

Fonte: elaborado pelos autores.

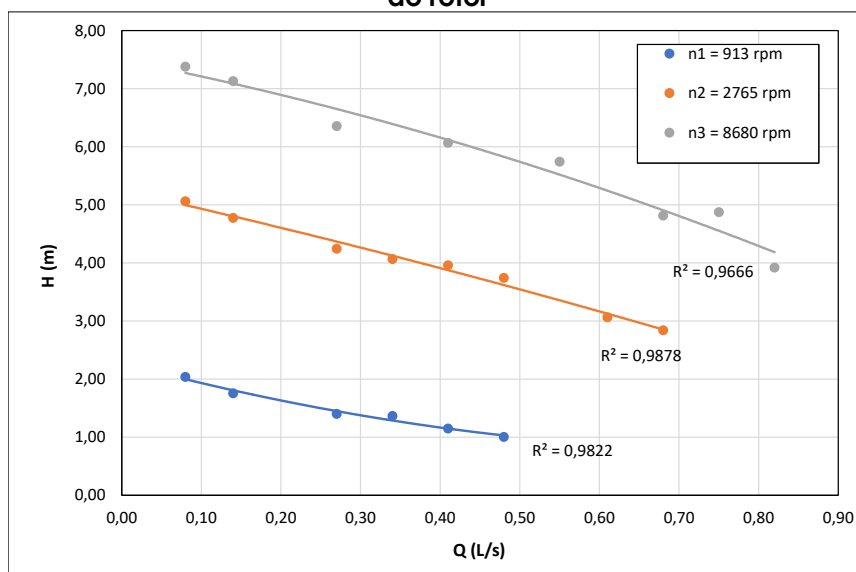
Com base nos dados de vazão e altura manométrica, foi possível construir a curva característica da bomba para três rotações do rotor (Figura 6). As curvas apresentadas são do tipo *rising*, em que a altura manométrica diminui continuamente à medida que a vazão aumenta. À medida que a rotação do rotor aumentou, a bomba apresentou maior energia por unidade de massa (ou peso) fornecida ao sistema para uma determinada vazão. As curvas obtidas em diferentes rotações estão em concordância com as leis de similaridade entre bombas. Com o aumento da rotação do rotor, a curva de vazão em função da altura manométrica situa-se acima daquela obtida com uma rotação menor. Neste caso, a relação de similaridade observada é definida pela seguinte equação:

$$\frac{H}{H_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \quad \text{Eq. [3]}$$

em que H é a altura manométrica para a rotação do rotor n e H_1 correspondem à altura manométrica para outra condição de rotação do rotor, n_1 .

A curva da bomba, chamada de *head*, pode ser definida como a energia por unidade de massa (ou peso) que a bomba pode fornecer ao sistema para uma determinada vazão. Essa curva auxilia na verificação de um determinado valor de vazão para sua altura manométrica correspondente; ou seja, é importante para analisar qual bomba adotar para o seu sistema de bombeamento (Fraga *et al.*, 2021). Uma bomba, quando projetada, é feita para operar em uma determinada vazão e prover uma altura manométrica, demandando determinada potência, oriunda de alguma fonte de energia mecânica que esteja operando a um certo número de rotações. Nessas condições, ela deve operar com máxima eficiência (Macintyre, 1997).

Figura 6 – Curvas características de vazão em função da altura manométrica para três rotações do rotor



Fonte: elaborado pelos autores.

As curvas obtidas apresentam comportamento polinomial de 2ª ordem. As equações polinomiais que representam a relação de vazão e altura manométrica da bomba são expressas a seguir:

Para $n_1 = 913$ rpm

$$H = 2,27 - 3,67Q + 2,23Q^2 \quad \text{Eq. [4]}$$

Para $n_2 = 2765$ rpm

$$H = 5,24 - 3,07Q - 0,65Q^2 \quad \text{Eq. [5]}$$

Para $n_3 = 8680$ rpm

$$H = 7,49 - 2,68Q - 1,65Q^2 \quad \text{Eq. [6]}$$

em que H é a altura manométrica em m.c.a. e Q é a vazão da água em L/s. Os valores de n usados nos testes experimentais não são números inteiros, como pode ser encontrado em catálogos de bombas centrífugas; isso porque a rotação do motor foi ajustada usando um potenciômetro conectado à fonte do motor elétrico. O potenciômetro foi usado em três condições empíricas de rotação: máxima, intermediária e baixa. A escolha da rotação intermediária e, principalmente, da



rotação baixa foi determinada pela capacidade da bomba de recalcar o fluido com o registro de gaveta (RG1) totalmente aberto. O intuito de fazer em três condições de rotação foi obter curvas com diferentes capacidades de carga fornecidas ao fluido, demonstrando que, com rotações mais altas do rotor, mais energia pode ser fornecida ao fluido de trabalho. A rotação do rotor em cada teste foi medida com um tacômetro.

As equações [4] a [6] foram coerentes com as características da bomba. As equações são expressões polinomiais que descrevem a curva característica $H \times Q$ da bomba e representam a energia por unidade de peso fornecida pela bomba ao fluido em função da vazão. A curva ajustada apresentou boa concordância com os dados experimentais. O R^2 obtido no ajuste das curvas foi bastante satisfatório, indicando baixo erro experimental.

Em termos gerais, pode-se afirmar que a bancada experimental é uma ferramenta poderosa para complementar os conceitos teóricos apresentados em sala de aula. A obtenção de curvas características fiéis aos perfis encontrados na literatura demonstra que houve rigor e acerto na construção da bancada, que não são tão simples de alcançar.

CONCLUSÕES

Conclui-se que é viável construir uma bancada didática de um sistema com bomba centrífuga, com base em conceitos teóricos de hidráulica, para o levantamento e o estudo de curvas características de uma bomba centrífuga, utilizando materiais disponíveis e de baixo custo. A partir dos resultados coletados por meio dos experimentos realizados na bancada, pode-se observar uma aplicação prática que resultou no desenvolvimento de curvas características em concordância com a teoria disponível na literatura. As curvas obtidas apresentaram perfis ajustados a modelos polinomiais, conforme descrito na literatura. O sistema construído foi robusto, sem vazamentos, e os instrumentos de medição de pressão e vazão se mostraram eficientes. Conclui-se também que a bancada, mesmo com instrumentos de medição de vazão e pressão de baixa precisão, apresentou resultados significativos. O uso de três diferentes rotações contribuiu para validar o sistema e confirmou que, quanto maior a energia mecânica fornecida ao fluido por uma bomba centrífuga, maior é a energia de pressão transferida ao fluido de trabalho, o que se traduz em curvas características com valores de altura manométrica maiores na mesma faixa de vazão.



REFERÊNCIAS

- ALÉ, J. A. V. **Sistemas fluidomecânicos**: sistemas de bombeamento. Rio Grande do Sul: PUC-RS, 2011.
- ANDRADE, A. F. *et al.* Bancada para ensaio e obtenção de performance de bomba centrífuga. **Revista Eletrônica Multidisciplinar Unifacear**, v. 3, n. 7, 2018.
- BACHUS, L. *et al.* **Know and understand centrifugal pumps**. 1. ed. New York: Elsevier, 2003.
- FRAGA, G. V. *et al.* **Bancada de teste de bombas centrífugas: elaboração das curvas características de uma bomba centrífuga**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Cachoeiro de Itapemirim, 2021.
- GIRDHAR, P. *et al.* **Practical centrifugal pumps**. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2005.
- GOMES, J. M. *et al.* Desenvolvimento de uma bancada didática para determinação de curva característica de bomba centrífuga. In: **Engenharias mecânica e industrial: projetos e fabricação**. Belo Horizonte: Atena Editora, 2018.
- MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997.
- NICOLI, E. P. *et al.* **Análise experimental de curvas de bombas centrífugas radiais**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.
- PERFEITO, L. P. K. **Projeto e construção de uma bomba centrífuga para fins educacionais**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica e Energia) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, RJ, 2024.